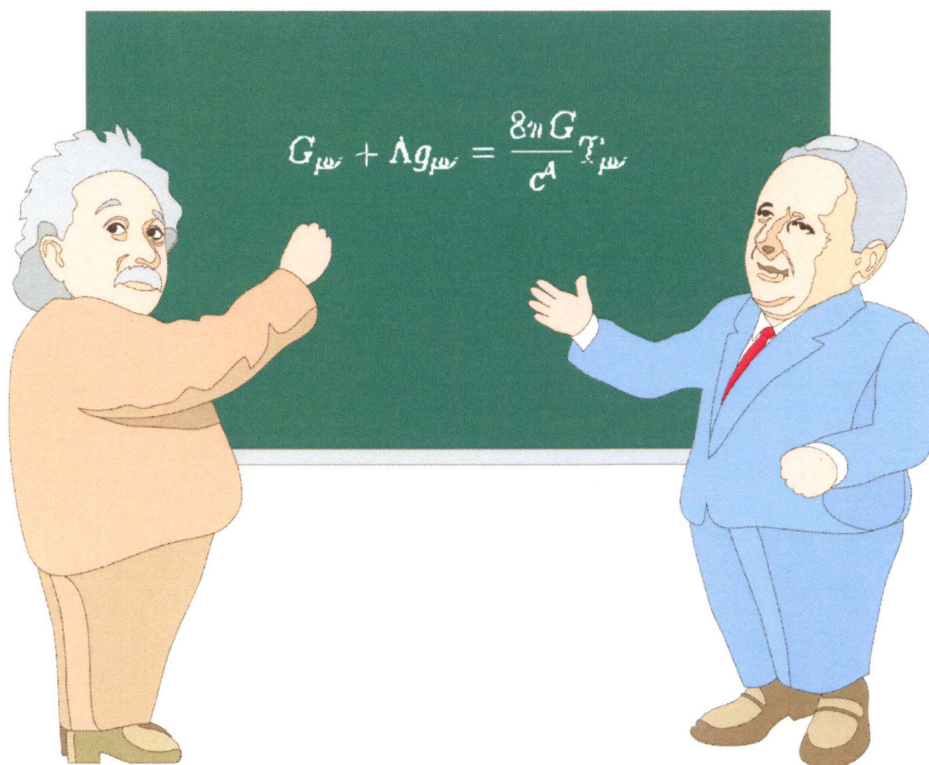


**[書評] リー スモーリン ; 松浦俊輔 訳 『迷走する物理学』 (武田ランダムハウスジャパン, 2007)**

著者	西村 泰一
発行年	2011-05
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/113338">http://hdl.handle.net/2241/113338</a>

## 【迷走する物理学】

この本は4部構成である。第I部は物理学におけるこれまでの統一へ向けた歴史を振り返っている。この本の著者は、標準模型が完成した1973年から後の物理学が迷走する時代を虚しく過ごしたという思いがあるので、そういう反省を踏まえて過去を振り返ってみたいという痛切な思いで書かれている。残りの3部はString Theoryの話である。第II部でString理



[Albert Einstein](#)(米 1879–1955) [Hermann Klaus Hugo Weyl](#)(独 1885–1955)

論の略史を振り返り、第III部でどういう形でString理論は乗り越えられるべきかが論じられる。第IV部はString理論のSociologyというべきもので、どうして物理学がString理論一辺倒になってしまったかが論じられる。ここでは著者の第I部を参考にしながら、KeplerからEinsteinまでを足早に見てみたい。

これまで全然別のものと思われていたものが、実は同じ取り扱いができ、同じものの別の現れ方に過ぎないとわかる時、科学は大きく進歩する。中世のヨーロッパの人たちにとって地上の世界と天上の世界はまったく別の世界だった。前者は俗界であり、後者は聖なる世界であった。大地は土からできていて、これは静止を求めるという特性を持っているため、大地は不動であると信じられた。これに対して天上の世界ではすべてのものはもっとも対称性の高い円に沿って動くことを強いられた。この円に対する執着はかなりのもので、惑星等の運動は楕円になるということを知っている我々から見ると常軌を逸しているように思われるが、彼らは円運動上でさらに円運動する周転円なるMechanismを導入して、惑星の運動や蝕を1/1000ぐらいの精度で予測することに成功している。こうした宇宙観というのは、古代ローマの市民であったギリシャ人のPtolemaeus(1世紀後半から2世紀半ば)に帰されている。Ptolemaeusは、天文学において、幾何学におけるEuclidのような位置を占め、Hipparchus(紀元前2世紀)やAristotle(388AD–322AD)といった先行する学者によるそれまでの天文学を集大成したといった色合いが強い。いずれにしてもその宇宙観が中世ヨーロッパを覆ったキリスト教的世界観と相性がよかったので、近代前夜までヨーロッパにおいて不動の位置を占めた。現在の我々の目からすると、周転円など馬鹿げていると一笑に付したくなる向きもあるかとおもうが、現代物理学で定石となって

いる対称性とその破れで攻めていくというApproachを何か髣髴させるものがあり、素直には笑えないのである。

Johannes Kepler(1570-1630)といえば、その3法則が有名であるが、これは3度目の正直で、そこに辿り着くまでに2つの失敗作を試みている。Keplerが生涯をかけて求めたのは、惑星の運動を統一し、それによって惑星の軌道を説明する原理であった。彼の最初の試みは、宇宙論というのはもっとも単純な図形だけを用いなければいけないという古代からの伝統に忠実に従ったもので、正多面体太陽系Modelとでも呼ぶべき代物であった。このKeplerによる統一理論は当時知られていた6つの惑星の軌道の直径を説明していた。その理論は数学的に美しかったが、これによって何か新しい現象が予測されたわけではなかった。それは完全に静的な理論で、惑星の軌道上の速さについては手付かずのままだった。そこで第2の試みで、Pythagoras以来よく知られていた和音の数学的理論に注目し、惑星は軌道を動くときに歌い、音の振動数は速さに比例し、その歌う音の高さは六声の和音であると主張した。六声といったのは、Keplerがこの理論を考えた頃には惑星として水星、金星、地球、火星、木星、土星の六つのみ知られていたためである。KeplerはこのIdeaが非常に気に入っていたようで、“天球の和音(Harmony of Spheres)”という呼称で呼んでいる。この理論の大きな問題点は、六声の和音は何通りもあり、ひとつには決まらないことである。さらにこの時代、望遠鏡が広まり始めるころで、天文学上の発見が相次ぎ(1930頃からの素粒子の発見Rushを思わせる)、Ptolemaeus以来の天空観は大きな変更を迫られることになる。たとえば、有名なGalileo Galilei(1564-1642)は、この望遠鏡を片手に、木星に4つの衛星を発見しており、この話はKeplerの耳にも届くことになる。Keplerというのは、とにかく思い込みの強い人で、何故だかさっぱりわからないのだが、Galileoのこの話を聞くまでは、地球、火星、木星の衛星の数は等比数列をなすと信じ、これをもとに火星の衛星の数を2個と予言した。この予言は結果としてあたるのであるが、木星の衛星の数については間違ったDataを信じていたのだから、何をか言わんやである。

Keplerは数学者としての顔も持っており、球を敷き詰めると、面心立方格子のときに最密になると予想した。これはKepler予想として有名で、規則正しく敷き詰める場合についてはGauss(1777-1855)によって肯定的に証明されたが、不規則な場合については20世紀末にComputerを駆使してやっと解決した。何か四色問題を思わせるものがある。

Keplerが今でも物理の教科書でお目にかかる3法則を発見したのは、17世紀前半の話である。Copernicus(1473-1543)の天動説は16世紀前半の話であり、これについてはKeplerも承知していた。ただし、Copernicusは、惑星は太陽を中心に円軌道を描くと信じていたが、何故太陽がすべての惑星の軌道の中心にくるかはまったく説明がなく、太陽の役目は単にすべてを照らすだけのことであった。これだと太陽のあるなしに関係なく、すべての惑星は太陽の位置を中心に回転することになるが、何か奇妙奇天烈な話である。この話にしかるべき説明を与えるという役目は後にNewton(1642-1727)が担うことになるが、Keplerもこの問題に苦しみ、とりあえず天文学の師匠でもあり共同研究者でもあったTycho Brahe(1546-1601)の残した詳細なDataを分析することで、惑星の軌道は、実は円ではなく、楕円であることをつきとめ、さらに太陽はその焦点にあることを見抜いた。これがKeplerの第一法則である。Keplerのこの一歩は大きかったが、この話を聞いたGalileoが“惑星の軌道が円以外のものであるはずがない”といったのは有名な話である。Copernicusにせよ、Galileoにせよ、まだ古典古代から中世にかけての円軌道の呪縛から自由になってはいない。Keplerの第2法則は面積速度一定の法則ともいわれ、現代的な用語でいうと、角運動量保存則となる。さらに惑星相互の速さの関係を支配する第3法則もほどなく見出し、Newtonへの地慣らしを完了する。このKeplerの3法則は、先ほど述べた失敗した2つの試みと違って、新しい惑星が見つかったも、少しも慌てる必要はなく、その軌道上の2点がわかると、軌道のすべてを決定できる。つまりこのKeplerの3法則は予測がおこなえる理論だということである。

天空の運動に関してNewtonを準備したのはKeplerであったが、地上の運動についてNewtonを準備したのはGalileo Galileiであった。中世のヨーロッパの人たちは、Aristotleに忠実に従って、ものを落下させる場合、軽いものより重いものが速く落ちると信じていた。Galileoが見出した落体の法則というのは、二つの部分からなり、第一法則は物体が自由落下するときの運動は物体の質量に全く依存しないということを主張し、第二法則は自由落下する距離は落下時間の二

乗に比例するというものであった。優れた物理学者は単純な法則を隠している夾雑物を見抜き、これを剥ぎ取る臭覚を有しているが、Galileoも間違いなくそうした物理学者の一人であった。こうしてNewtonの登場を待つだけとなる。

Newtonの発見の核心は天空の物理学と地上の物理学の統一にある。それが人口に膾炙している林檎が木から落ちるのを見てであったのかどうかはさておき、太陽が惑星に及ぼす力と我々を地上に繋ぎ止めている力が同じであると喝破した点に彼の本領がある。こうしてNewtonは重力の古典的理論の創始者となり、20世紀前半にEinsteinの一般相対性理論にとって替わられるまで、これが唯一の重力の理論だった。今でもRocketsをNASAあたりから打ち上げる折に用いられている重力の理論はNewtonのもので、そしてこれで充分である。現在、物理学では4つの力(重力、電磁力、弱い力、強い力)が知られているが、最初に体系的な理論が作られたのは重力だった。ただし20世紀にはいって量子物理の時代に入ると、この重力がもっとも取り扱いが難しい力となるのは皮肉な話である。

NewtonとLeibniz(1646-1716)の間の論争というと、いわゆる微積分学の優先権論争が有名であるが、そんな話より二人の立場の基本的な相違はNewtonが絶対主義者であり、Leibnizが相対主義者であることだろう。NewtonはCopernicus革命の頂点をなすその著書Principiaの序文で“外部の何物とも関係を持たない絶対空間は、本質的に常に変わらず不動である”と述べている。時間についても同様に、“絶対で真の数学的時間は、自発的かつ本質的に、外部の何物とも関係せず一様に流れている”と述べている。これがLeibnizにくると、空間は“共存の秩序”となり、時間は“物事の連続した順序”となる。Leibnizがその相対主義を展開するにあたって、拠り所とするのは根拠律である。根拠律というのは、宇宙で起こるすべてのことには明白な理由があるはずだとする信念で、彼の宇宙の合理性に対する全幅の信頼を表している。もしも絶対空間があるとしたら、全宇宙が、左へ10mずれても、何か違いがあるだろうか？この問いに対して、絶対主義者であるNewtonはYesと言い、相対主義者であるLeibnizはNoと言った。そして、これが絶対主義と相対主義を分かつ分水嶺となる。時間についても、もしも絶対時間があるとしたら、宇宙の始まりが10分遅れることに何か意味があるだろうか？ここでも、絶対主義者であるNewtonはYesと言い、相対主義者であるLeibnizはNoと言う。

NewtonとLeibnizのどちらの哲学的立場がすぐれているかという議論はさておき、Newtonの絶対空間と絶対時間の哲学はその後2世紀にわたって物理学を支配した。理由は簡単で、そのほうが運動を簡単に記述できたからである。実際、Leibnizは、相対主義の哲学を展開したが、それに基づいて物理学を展開したわけではない。特に、等速度運動と加速運動の違いについて、全く論じていない。絶対空間のあるNewtonにとっては、この違いは簡単である。そして、この違いを物理学として相対主義の立場から展開するという話は、Ernst Waldfried Joseph Wenzel Mach(1838-1916)を経て、Einsteinの一般相対性理論まで待たなくてはならなかった。

古典電磁気学で、古典力学のNewtonにあたるのがJames Clerk Maxwell(1831-1879)であり、GalileoにあたるのがMichael Faraday(1791-1867)あたりになるのであろうか？もっともGalileiは大学で数学を教える数学者でもあったが、Faradayはまともな教育は受けていず、小学校卒である。Faradayの父親は鍛冶職人で、結婚して10人の子供をもうけているが、Michael自身は3番目の息子であった。当然一家は貧しく、彼は13歳で製本工場で見習いとして働き始めている。Faradayの才能を見出したのは、Humphry Davy(1778-1829)という化学者で、この人はカリウムやナトリウムの発見者であるが、御本人の弁によると、“私の最大の発見はFaradayを見出したこと”とのことである。Faradayは、数学の素養がないのを補ってあまりある幾何学的な直観力に恵まれ、電気や磁気を場として最初にとらえたのは彼だった。高校の物理で習う電磁誘導の法則を見出したのも彼である。

Maxwellが目にしたのは電場と磁場が混じった現象である。たとえば電荷が円運動すると磁場が生じる。Maxwellは電場と磁場を統一するために既に知られている方程式にひとつの項を加えた。この統一の持つ意味は大きく、電場と磁場は入れ替わられるようになり、電磁波の存在を予測する。さらにこの理論から電磁波の速さも計算でき、それは光の速度に等しい。こうして、電場と磁場を統一しようとしたMaxwellは、予期せぬ形で光の理論も作り出してしまった。20世紀にはいると、物理学者は物質よりも場が基本的であるという考え方を受け入れられるようにな



るが、FaradayやMaxwellが生きた19世紀というのは、機械論者はすべての現象の背後に物質がないと不安で仕方がなかった。今の我々からすると、笑い話の類となるが、熱は熱素という物質による考え方が一般的であった。たとえば今でも熱力学の教科書に必ずその名前がでてくるCarnot(1796－1832)あたりも完全に熱素論者であった。そんな具合であったから、19世紀の物理学者がこの電磁波を運ぶ媒体としてEtherを想定したのは至極自然であったと言えるだろう。

よく知られているように、Jesus ChristをJesus ChristたらしめたのはSaint Paulであるが、MaxwellをMaxwell たらしめたのはHeinrich Rudolf Hertz(1857－1894)である。Hertzは基本的には実験物理学者と言っていると思うが、現在よく見かける必要最小限の理論しか理解していない並みの実験家とは一味もふた味も違う。現在Maxwellの方程式として知られている簡潔な4つの方程式はHertzによるもので、Maxwellのもとの方程式はこんな生易しいものではなかった。Hertzは1873年から1888年にかけて、Maxwellの予測をすべて実証している。Radios, Televisions, Radarsといった電磁波技術の応用はGugliermo Marconi(1874－1937)等の発明家に手に委ねられた。ちなみにHertz自身は、Nobel賞が始まる前になくなっているのだから、当然のことながら、これを受賞していないが、甥のGustav Ludwig Hertz(1887－1975)はJames Frank(1882－1964)と一緒に1925年にNobel物理学賞を受賞している。受賞理由は1912年から1914年にかけて行われたFrank=Hertzの実験で、これで原子のとりうるEnergyが離散的であることが示された。

Maxwellの理論はNewton力学の根底をなすGalileoの相対性原理に矛盾する。なぜなら光の速度を測定してやることで、静止系か等速度運動系かを簡単に判定できるように見えるからである。ここでAlbert Einstein(1879－1955)の登場となる。Einsteinは、Maxwellの統一は本人が思っている以上に深いことを見抜き、Galileoの静止と等速度運動の統一を、Maxwellの電気と磁気の統一に合体させた。結果として、光速は観測者の運動とは独立となり、時間と空間は統一されて、時空となる。Einsteinが1905年に発表したこの理論は、特殊相対性理論としてよく知られている。

Einsteinの特殊相対性理論で古典電磁気学は完璧な形になったが、これとNewton以来の重力の理論とどのようにReconcileさせるかという問題が残った。いわゆる統一場理論の話である。一番乗りはFinlandのGunnar Nordström(1881－1923)で、1914年の話である。3次元の空間の次元をひとつ増やして4次元とし、ここで電磁気の方程式を書き下すと、重力ができて、Einsteinの特殊相対性理論とも適合した。問題は、この4番目の次元は我々には見えないので、なんらかの形で隠す必要がある。そこで4番目の次元を円にし、しかも半径を非常に小さくして、我々には見えないようにした。こうして重力と電磁気が非常にスッキリと統一される。最近の紐理論あたりでよく出てくる隠れた次元という話はすべてここを淵源とする。

その頃、Einsteinはまったく別の方向で格闘していた。Einsteinが目指したのは、Galileoが何世紀も前に見出していた静止と等速度運動の統一を、すべての運動の統一に拡張することだった。Einsteinは加速度の効果は重力の効果と区別できないことに気づき、等価原理と名づけた。基本となる考え方はさほど難しいものではないが、これをきちんとした理論に仕上げるのに、10年という歳月を要し、正式の発表は1915年である。一般相対性理論の成立である。一般相対性理論以前は、時間と空間は不変で、物理現象が起こる絶対の背景をなした。一般相対性理論では、時空というのは、ほぼ重力場と同じことである。比喩的な言い方を許してもらえば、一般相対性理論以前は、固定された舞台(これが時空にあたる)があって、そこで芝居(これが色々な物理現象にあたる)が演じられた。しかし、Einsteinの一般相対性理論では芝居が舞台を形作り、舞台は芝居に合わせてDynamicに変化する。前者のような理論を背景依存(Background-Dependent)と言い、後者のような理論を背景非依存(Background-Independent)と言う。紐理論は背景依存であり、残念ながらこれだけでも究極の理論でなどないことがわかる。

こうして1910年代半ばには2つの拮抗する重力理論があった。ひとつは先述したNordströmによる非常にスッキリした重力と電磁気を統一した理論で、他方にEinsteinの一般相対性理論があった。幸い、両者は違う予測をした。前者の理論では、光はいつもまっすぐに進むだけであっ

たが、後者の理論は、重力は光を曲げることを予測し、どれだけ曲げるかも正確に予測した。こうしてどちらをとるべきかは、観測に委ねられた。決着をつけたのは、1919年5月29日の皆既日食の折の天文学者のArthur Stanley Eddington(1882—1944)による太陽の近くの恒星の写真撮影であった。この写真では、一般相対性理論が予測したように、この恒星の位置は本来の位置からずれていた。この話は当時大変なSensationを巻き起こした。

ところで、Eddingtonというのは控えめな人物で、それを雄弁に物語るEpisodeが残っている。1919年の11月6日、Royal SocietyのMeetingでEinsteinのRelativityのExpertと自他共に認めるPoland人のLudwik Silberstein(1872—1948)がEddingtonに歩み寄り、“世界中に相対性理論を理解している人間は3人しかいませんね”と話しかけた。Silbersteinとしては、Einsteinと自分とEddingtonの3人のつもりだった。しかしEddingtonからの返答は“3人目は一体どなたでしょうか？”というものだった。

ちなみに、Einsteinが一般相対性理論のIdealにきちんとした数学的定式化を与えることができずに苦しんでいた折に、救いの手を差し伸べたのは、数学者のMarcel Grossman(1878—1936)である。彼がEinsteinにRiemann幾何学を手ほどきしたおかげで、一般相対性理論はやっと日の目を見ることができた。相対性理論の研究者達は、これに対する感謝の気持ちを忘れず、Grossmanのこの貢献を記念して、3年ごとにMarcel Grossman Meetingsを開いている。

Nordströmの理論はEddingtonの観測で葬られたが、“隠れた次元”という話は不死鳥のごとく、何度も蘇ってくる。現在流行の紐理論でこれが十八番になっていることはよく知られているが、ここでは一時期Einsteinも虜にしたKaluza-Klein理論について見てみよう。Nordströmは5次元空間にMaxwellの電磁気学を適用して、重力がでてくることをみたが、1919年にドイツの物理学者Theodor Kaluza(1885—1954)は、Einsteinの一般相対性理論を5次元空間に適用して、電磁気が出でくることを示した。この話は1920年代にOskar Klein(1894—1977)というSwedenの物理学者によって再発見された。EinsteinはこのKaluza-Klein理論にすっかり夢中になった。しかし熱狂はほどなく冷めた。この理論のアキレス腱は、第5の次元を隠すために、単に小さく丸めて円にしたのみならず、電磁気を導き出すためにはこの円の半径は時間的にも空間的にも変化してはいけないという点だった。しかし、一般相対性理論の基本Thesisは時空の幾何学的構造が流動的であることを主張するので、そうであるなら、この円の半径も当然変化してしかるべきである。そうすると、Maxwellの理論で、電場と磁場が入れ替わりうるように、重力と電磁気力が入れ替わるような現象も観測されなければならないはずであるが、いまままでにそのような現象が観測されたことはない。事態はさらに悪く、この半径の固定された微小な円に対応する解は不安定であることがわかる。幾何学的構造を少しいじると、この微小な円は時間の終わりを示す特異点に潰れてしまうし、ほかのいじり方をすると、今度は円が大きくなり、余剰次元が簡単に見えてしまう。こうしてこの理論は全く信用できなくなる。

一般相対性理論を高次元に拡張したところにYang-Mills理論(Gauge理論)が隠れているという話は1950年代の話題となる。しかし、その意味が理解されるには、強い核力と弱い核力がこの理論で記述される1970年代を待たねばならなかった。

この後も隠れた次元の話は何度も顔をだすが、求める物理学を得るために余剰次元にかける制約が、理論を破壊する種となった。次元が増えて自由度が増せば増すだけ、幾何学的構造を固定するために支払わなければいけない代償が増え、理論はますます不安定になる。

物理の世界には偉大な人物が犯す愚行が満ちている。Ernst Waldfried Joseph Wenzel MachはEnergy保存則や原子の存在を信ぜず、James Clerk MaxwellはEtherの存在を信じ、Albert Einsteinは、発展していく量子力学に背を向けて、統一場理論を追い求め続けた。物理学というのは間違いなく、High—Risk—High—Returnの学問である。

量子力学は、1920年代半ばにWerner Karl Heisenberg(1901—1976)とErwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger(1887—1961)によって理論としての形を整える。1930年代にはいると物理学は素粒子論の時代に突入する。こうした局面を迎えて、物理学の主流は一般相対性理論のような背景非依存の理論を棚上げし、固定された時空でやっていく路線を選択した。重力なんて、MicroのLevelでは問題にならないのだから、それで充分というわけである。これは

短期的な戦略としては、それなりに賢明な選択で、実際それから半世紀ぐらいの素粒子物理学の進展は目を見張らせるものがある。しかし、この戦略は短期的戦略にしかすぎず、現在の物理学の迷走を打破するには、もういちど、一般相対性理論の精神にしっかりと向き合うことが求められている。そしてそれは決して簡単な話ではない。一般相対性理論にRiemann幾何学が必要であったごとく、数学の側でもそれなりのものを用意する必要があると思われる。

この本の著者のSmolinは、Einsteinの一般相対性理論の原論文を読んで物理学の世界に入ってきたひとであるから、これに対する評価はきわめて高い。String理論については門外漢ではなく、そこで仕事をしたこともある方である。String理論については、変に感情的にならず、Balanceのとれた解説がされていると思われる。是非一読を薦めたい。

H. Nishimura (文責)